达氏鳇幼鱼对 6 种蛋白质原料中营养物质的表观消化率

吴金平　褚志鹏　陈细华*　唐　丹　乔新美　李创举　岳华梅　阮　瑞　刘　伟

（中国水产科学研究院长江水产研究所，农业部淡水生物多样性保护重点实验室，武汉 430223）

摘　要：为了解达氏鳇（*Huso dauricus*）幼鱼对不同蛋白质原料的消化能力，以 0.4%的二氧化钛(TiO_2)为指示剂，分别将鱼粉、鸡肉粉、肉骨粉、羽毛粉、双低菜粕和玉米蛋白粉这 6 种蛋白质原料与基础饲料按照 3:7 的比例配制试验饲料，测定达氏鳇幼鱼对这 6 种蛋白质原料干物质、粗蛋白质、粗脂肪、总能和总氨基酸的表观消化率。挑选初始体质量为（66.79±2.18） g 的达氏鳇幼鱼 420 尾，随机分为 7 组，每组 3 个重复，每个重复放鱼 20 尾。基础饲料投喂 2 周后，开始用试验饲料投喂，试验饲料投喂 1 周后采用捞网收集成形的粪便，共收集 10 d。结果表明：达氏鳇幼鱼对鱼粉、鸡肉粉、肉骨粉、羽毛粉、双低菜粕和玉米蛋白粉这 6 种蛋白质原料中干物质、粗蛋白质、粗脂肪、总能和氨基酸的表观消化率分别为 54.79%～88.07%、73.62%～89.47%、99.80%～100.74%、66.64%～89.24%、51.27%～98.62%。在 6 种蛋白质原料中，粗脂肪的表观消化率均在 99%以上，而干物质、粗蛋白质和总能表观消化率则以鱼粉和鸡肉粉较高，玉米蛋白粉和双低菜籽粕次之，肉骨粉和羽毛粉较差。其中，鱼粉的粗蛋白质表观消化率最高，为 89.47%，显著高于其他蛋白质原料（$P<0.05$）；鸡肉粉次之，为 81.14%，与肉骨粉、双低菜籽粕和玉米蛋白粉差异不显著（$P>0.05$）；羽毛粉的粗蛋白质表观消化率最低，为 73.62%，与肉骨粉差异不显著（$P>0.05$），与其他蛋白质原料差异显著（$P<0.05$）。各蛋白质原料中总氨基酸的表观消化率与粗蛋白质的表观消化率的变化趋势基本一致。由此可知，对于达氏鳇幼鱼饲

收稿日期：2018-04-20
基金项目：现代农业产业技术体系专项资金（CARS-46）
作者简介：吴金平（1989—），男，湖北武汉人，助理研究员，硕士，从事鲟鱼营养与饲料研究。E-mail: Wujinping@yfi.ac.cn
*通信作者：陈细华，研究员，硕士生导师，E-mail: chenxh@yfi.ac.cn

料，鱼粉是最佳的蛋白质来源，鸡肉粉、玉米蛋白粉和双低菜籽粕亦可以作为其优质的蛋白质来源，而羽毛粉和肉骨粉作为蛋白质来源时，要控制其在饲料中的用量。

关键词：达氏鳇幼鱼；蛋白质原料；营养物质；表观消化率

中图分类号：S963　文献标识码：A　　文献编号：

达氏鳇（*Huso dauricus*）是鲟形目鲟科中 2 种鳇属鱼类之一，也是我国黑龙江流域 2 种土著鲟鱼之一。以达氏鳇为母本、同产黑龙江的施氏鲟（*Acipenser schrenckii*）为父本杂交产生的“鲟龙 1 号”是目前我国主养鲟鱼品种之一。目前已有一些关于鲟鱼蛋白质、脂类、糖类、维生素和矿物质等需要量的研究[1-3]，但这些研究还不能满足鲟鱼产业的需求。据调查，产业用的鲟鱼饲料配方主要参考鳗、鳖等，缺乏必要的基础研究，同时尚没有获得任何一种鲟鱼的全套营养学资料[4]，为此，开展鲟鱼相关的饲料研究已迫在眉睫。

鲟鱼是偏肉食性鱼类，养殖商品鲟鱼的饲料粗蛋白质含量需达到 40%左右，亲鱼料或苗料中粗蛋白质含量甚至要更高，因此，寻找适合鲟鱼的动、植物蛋白质源很重要。在水产饲料的生产中，测定养殖动物对饲料原料营养物质的表观消化率是评定饲料原料营养价值的重要手段，也是配制营养平衡、成本合理的渔用配合饲料的重要步骤[5-6]。这对于控制各种原料在饲料中的适宜添加比例、提高水产饲料的消化利用率、减少饲料养殖水域的污染及节约养殖成本等有关键性的作用[7]。目前，关于鲟对蛋白质原料营养物质消化利用的报道仅见李向松等[8]、Liu 等[9]和 Safari 等[10]，他们分别报道了杂交鲟幼鱼(*A. gueldenstaedti*♂×*A. baerii*♀)、西伯利亚鲟(*A. baerii*)幼鱼和欧洲鳇亚(*Huso huso*)成鱼对蛋白质原料营养物质的消化利用，而关于达氏鳇幼鱼对蛋白质原料营养物质消化利用的研究还未见报道。鉴于此，本试验以达氏鳇幼鱼为研究对象，测定其对鱼粉等 6 种蛋白质原料营养物质的表观消化率，以期为鲟绿色环保饲料的开发提供理论支撑。

1　材料与方法

1.1　待测蛋白质原料与试验饲料

试验选用的 6 种蛋白质原料为鱼粉、鸡肉粉、肉骨粉、羽毛粉、双低菜籽粕和玉米蛋白粉等，其中鱼粉（秘鲁）、羽毛粉（不详）、双低菜籽粕（加拿大）和玉米蛋白粉（河南）来自武汉大北农水产科技有限公司；鸡肉粉（美国）和肉骨粉（澳大利亚）来自于浙江兴龙马饲料有限公司，其营养水平及氨基酸组成见表 1。以 0.4%的二氧化钛(TiO_2)为指示剂，配制基础饲料，其组成及营养水平见表 2。所有原料粉碎后过 60 目筛，添加 0.4%的二氧化钛作为标记物，采用逐级混匀法混合均匀制成基础饲料。分别将鱼粉、鸡肉粉、肉骨粉、羽毛粉、双低菜粕和玉米蛋白粉这 6 种蛋白质原料与基础饲料按照 3:7 的比例配制试验饲料。取 70%添加 TiO_2 的基础饲料和 30%的待测蛋白质原料，充分混匀后，添加 20%左右的水，再次混匀，用小型绞肉机制成直径约 3 mm 的条状饲料。风扇吹干后，置于-20 ℃冰箱中保存备用。

表 1　基础饲料组成及营养水平（干重）

Table 1　Composition and nutrient levels of the basal diet (DM basis)　%

项目 Items	含量 Content
原料 Ingredients	
白鱼粉 White fish meal	32.00
鸡肉粉 Chicken meal	8.00
豆粕 Soybean meal	25.00
鱼油 Fish oil	3.25
豆油 Soybean oil	3.25
面粉 Wheat flour	23.90
氯化胆碱 Choline chloride	0.20
磷酸二氢钙 $Ca(H_2PO_4)_2$	1.00

预混料 Premix	3.00
二氧化钛 TiO_2	0.40
合计 Total	100.00
营养水平 Nutrient levels	
粗蛋白质 Crude protein	50.60
粗脂肪 Crude lipid	11.59
水分 Moisture	8.10
粗灰分 Ash	11.47
总能 Gross energy/(MJ/kg)	20.69
总磷 Total phosphorus	2.28

维生素预混料为每千克饲料提供 Vitamin premix provided the following per kg of the diet: VB_1 50 mg，VB_2 200 mg，VB_6 50 mg，VB_{12} 20 mg，叶酸 folic acid 15 mg，VC 325 mg (30%)，泛酸 pantothenate 400 mg，肌醇 inositol 1 500 mg，*D*-生物素 *D*-biotin 5 mg (2%)，烟酸 niacin 750 mg，VA 2.5 mg，VE 100 mg (50%)，VD_3 2 mg，VK 20 mg，$Ca(H_2PO_4)_2$ 1 800 mg，KH_2PO_4 1 350 mg，NaCl 500 mg，$MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 750 mg，$NaH_2PO_4 \cdot 2H_2O$ 650 mg，KI 1.5 mg，$COSO_4 \cdot 6H_2O$ 2.5 mg，$CuSO_4 \cdot 5H_2O$ 15 mg，$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 350 mg，$FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 1250 mg，$MnSO_4 \cdot 4H_2O$ 80 mg，Na_2SeO_3 6.00 mg。

表 2 待测蛋白质原料的营养水平和氨基酸组成（干物质）

Table 2 Nutrient levels and amino acids composition of test protein ingredients (DM basis) %

项目 Items	鱼粉 Fish meal	鸡肉粉 Chick meal	肉骨粉 Meat and bone meal	羽毛粉 Feather meal	双低菜籽粕 Canola meal	玉米蛋白粉 Corn gluten meal

营养水平 Nutrient levels						
水分 Moisture	10.75	7.66	6.25	7.70	11.57	9.55
粗蛋白质 Crude protein	67.53	68.83	46.65	87.72	43.02	65.93
粗脂肪 Crude lipid	6.94	12.03	9.05	9.50	0.58	0.75
粗灰分 Ash	22.34	12.51	38.75	0.72	7.27	3.44
总磷 Total phosphorus	3.63	2.27	7.57	0.15	1.27	0.44
总能 Gross energy/(MJ/kg)	19.56	22.39	14.81	25.78	19.85	23.67
氨基酸组成 Amino acid composition						
天冬氨酸 Asp	6.31	6.01	3.10	4.97	3.23	3.95
谷氨酸 Glu	10.40	11.89	5.83	9.27	8.21	16.56
丝氨酸 Ser	3.17	1.01	1.66	2.56	1.82	3.44
组氨酸 His	1.33	0.69	0.61	1.17	1.10	1.30
甘氨酸 Gly	5.01	7.59	7.70	6.68	2.24	1.95
苏氨酸 Thr	2.99	4.25	1.33	2.46	1.86	2.30
精氨酸 Arg	4.76	7.03	3.66	2.27	2.73	2.15
丙氨酸 Ala	4.27	4.07	3.70	9.20	1.94	6.13
酪氨酸 Tyr	1.76	2.50	0.70	1.74	0.98	2.77
半胱氨酸 Cys	0.22	2.44	0.10	0.24	0.29	0.38
缬氨酸 Val	3.36	6.85	1.72	3.02	2.22	3.14
蛋氨酸 Met	1.94	0.81	0.51	1.28	0.39	1.80
苯丙氨酸 Phe	2.67	4.44	1.37	2.49	1.84	4.44
异亮氨 Ile	3.01	4.70	1.23	2.60	1.92	3.01
亮氨酸 Leu	5.18	7.63	2.47	4.60	3.14	11.47

赖氨酸 Lys	5.72	2.28	2.37	4.25	2.50	1.16
脯氨酸 Pro	2.25	11.23	5.18	4.86	1.75	5.19

1.2 试验鱼与养殖条件

达氏鳇受精卵来源于黑龙江抚远江段野生个体自然繁殖的，受精卵运至长江水产研究所荆州太湖基地进行孵化培育，待体质量达到试验要求的规格后进行分组。试验开始前，挑选规格一致、表观健康的初始体质量为（66.79±2.18） g 的达氏鳇幼鱼 420 尾，随机分养于 21 个流水养殖桶（直径 105 cm，体积 0.43 m^3）中，每桶放鱼 20 尾。分桶后，先用基础饲料投喂，每天表观饱食投喂 2 次（08:00、15:00），基础饲料投喂 2 周后，开始用试验饲料投喂，每种试验饲料投喂 3 桶鱼，投喂 1 周后开始采用捞网收集成形的粪便，共收集 10 d。试验期间采取自然光照，水源为过滤后的地下水，水温 18.2～20.0 ℃，溶氧浓度≥ 5 mg/L，pH 7.8～8.2。

1.3 粪便收集

每天的上午和下午投喂后 0.5 h 进行排污，排出桶中残余的饲料和粪便，于每天的 10：00—13：00 和 17：00—18：00 用密网捞取饱满和成形的粪便，并放入对应编号的培养皿中，随后置于-20 ℃冰箱中冻藏。待粪便收集至足够的量后，于真空冷冻干燥机中干燥，干燥时间约 72 h，粉碎后放入样品袋中，于-40 ℃冰箱中冷藏备用。

1.4 指标测定

饲料和粪便的粗蛋白质、粗脂肪、粗灰分含量分别采用凯氏定氮法（GB/T 5009.5-2003）、索氏抽提法（GB/T 5009.6-2003）和灼烧称重法（GB/T 5009.4-2003）测定，总能采用氧弹测热仪（Parr-6200）直接测定，氨基酸含量采用氨基酸分析仪（安捷伦-1260）参照 GB/T 5009.124-2016 中方法测定，TiO_2 含量参照文献[11]中方法测定。饲料磷含量采用酸消化后比色法（GB/T 5009.87-2016）测定。

饲料(包括基础饲料和试验饲料)的粗蛋白质、粗脂肪、氨基酸和总能表观消化率按式

（1）计算，饲料的干物质表观消化率按式（2）计算:

$$ADC_{d}（\%）=[1-(P_f/P_d)\times(R_d/R_f)]\times100；\quad（1）$$

$$ADC_{dm}（\%）=[1-(R_d/R_f)]\times100。\quad（2）$$

式中：ADC_d 为试验饲料的粗蛋白质、粗脂肪、氨基酸或总能表观消化率（%）；ADC_{dm} 为试验饲料的干物质表观消化率；P_f 为粪便中粗蛋白质、粗脂肪、氨基酸含量（质量分数，%）或总能（MJ/kg）；P_d 为试验饲料中粗蛋白质、粗脂肪、氨基酸含量（质量分数，%）或总能（MJ/kg）；R_d 为试验饲料中 TiO_2 的含量（质量分数，%）；R_f 为粪便中 TiO_2 的含量（质量分数，%），

6 种待测蛋白质原料的营养物质表观消化率按式（2）计算：

$$ADC_i=ADC_t+[(ADC_t-ADC_r)\times(0.7\times E_r)/(0.3\times E_i)]。$$

式中：ADC_i 为待测蛋白质原料的干物质、粗蛋白质、粗脂肪、氨基酸或总能的表观消化率（%）；ADC_t 为含 30%待测蛋白质原料的试验饲料的干物质、粗蛋白质、粗脂肪、氨基酸或总能表观消化率（%），根据式（2）计算；ADC_r 为基础饲料的干物质、粗蛋白质、粗脂肪、氨基酸或总能表观消化率（%），根据式（1）计算；E_r 为基础饲料中干物质、粗蛋白质、粗脂肪、氨基酸含量（质量分数，%）或总能（MJ/kg）；E_i 为待测蛋白质原料中干物质、粗蛋白质、粗脂肪、氨基酸含量（质量分数，%）或总能（MJ/kg）。

1.5 数据处理与分析

试验结果以平均值±标准差表示。所有数据采用 SPSS 22.00 软件，经 one-way ANOVA 和 Duncan 氏法多重比较，$P<0.05$ 表示组间有显著性差异。

2 结　果

达氏鳇幼鱼对 6 种蛋白质原料中干物质、粗蛋白质、粗脂肪和总能的表观消化率见表 3。达氏鳇幼鱼对 6 种蛋白质原料中干物质表观消化率为 54.79%～88.07%，其中鱼粉的干物质表观消化率最高，鸡肉粉次之，均达到 80%以上，二者显著高于肉骨粉和双低菜籽粕

（P＜0.05）；肉骨粉的干物质表观消化率最低，与其他蛋白质原料相比差异显著（P＜0.05）；羽毛粉的干物质表观消化率为 72.35%，与鸡肉粉、双低菜籽粕和玉米蛋白粉无显著差异（P＞0.05）。达氏鳇幼鱼对 6 种蛋白质原料中粗蛋白质的表观消化率较高，均在 73%以上，其中鱼粉的粗蛋白质表观消化率最高为 89.47%，显著高于其他蛋白质原料（P＜0.05）；鸡肉粉次之，为 81.14%，与肉骨粉、双低菜籽粕和玉米蛋白粉差异不显著（P＞0.05）；羽毛粉的粗蛋白质表观消化率最低，为 73.62%，与肉骨粉差异不显著（P＞0.05），与其他蛋白质原料差异显著（P＜0.05）。达氏鳇幼鱼对 6 种蛋白质原料中总能的表观消化率为 66.64%～103.18%，其中鱼粉的总能表观消化率最高，鸡肉粉次之，均达到 89%以上，二者显著高于肉骨粉和羽毛粉（P＜0.05）；羽毛粉的总能表观消化率最低，为 66.64%，显著低于鱼粉、鸡肉粉和玉米蛋白粉（P＜0.05），与肉骨粉和双低菜籽粕差异不显著（P＞0.05）。达氏鳇幼鱼对 6 种蛋白质原料中粗脂肪的表观消化率均在 99%以上，6 种蛋白质原料之间差异不显著（P＞0.05），其中双低菜籽粕的粗脂肪表观消化率最高，为 100.74%。

表 3　达氏鳇幼鱼对 6 种蛋白质原料中干物质、粗蛋白质、粗脂肪和总能的表观消化率

Table 3　Apparent digestibility of dry matter, crude protein, crude lipid and gross energy in six protein ingredients of juvenile kaluga （*Huso dauricus*） %

项目 Items	干物质 Dry matter	粗蛋白质 Crude protein	总能 Gross energy	粗脂肪 Crude lipid
鱼粉 Fish meal	88.07±3.84^{d}	89.47±1.51^{d}	103.18±5.12^{c}	100.34±0.08
鸡肉粉 Chick meal	83.18±7.06^{cd}	81.14±3.16^{bc}	89.24±6.48^{b}	100.07±0.04
肉骨粉 bone and meat meal	54.79±4.44^{a}	76.24±2.08^{ab}	70.86±4.52^{a}	99.89±0.04
羽毛粉 Feather meal	72.35±7.10^{bc}	73.62±2.71^{a}	66.64±7.63^{a}	99.80±0.08

双低菜籽粕 Canola meal	68.68±4.94^{b}	79.52±2.11^{cb}	76.81±7.80^{ab}	100.74±1.06
玉米蛋白粉 Corn gluten meal	79.34±7.80^{bcd}	79.52±3.78^{b}	88.57±8.80^{b}	100.47±0.94

同列数据肩标不同字母表示差异显著(P<0.05)。

Values in the same column with different letter superscripts were significantly different (P<0.05).

达氏鳇幼鱼对 6 种蛋白质原料中氨基酸的表观消化率见表 4。各蛋白质原料中各氨基酸的表观消化率与其粗蛋白质的表观消化率呈相同的变化趋势。6 种蛋白质原料中，鱼粉的总氨基酸表观消化率是最高的，为 98.62%，与其他蛋白质原料差异显著（P＜0.05）；羽毛粉的总氨基酸表观消化率在 6 种蛋白质原料中是最低的，为 51.27%，与其他蛋白质差异显著（P＜0.05）；鸡肉粉、双低菜籽粕和玉米蛋白粉的总氨基酸表观消化率居中，这 3 种蛋白质原料之间无显著差异（P＞0.05），并均显著高于肉骨粉（P＜0.05）。

表 4 达氏鳇幼鱼对 6 种蛋白质原料中氨基酸的表观消化率

Table 4 Apparent digestibility of amino acids in six protein ingredients for juvenile kaluga (*Huso dauricus*) %

项目 Items	鱼粉 Fish meal	鸡肉粉 Chick meal	羽毛粉 Feather meal	肉骨粉 bone and meat meal	双低菜籽粕 Canola meal	玉米蛋白粉 Corn gluten meal
非必需氨基酸 Non-essential amino acids						
天冬氨酸 Asp	97.97±4.09^{e}	71.41±6.58^{c}	40.82±6.37^{a}	58.88±1.34^{b}	83.75±5.90^{d}	85.84±2.21^{d}
谷氨酸 Glu	97.49±5.05^{e}	79.12±4.84^{bc}	51.76±3.83^{a}	69.63±8.53^{b}	90.39±1.87^{de}	81.22±5.74^{cd}
丝氨酸 Ser	96.95±4.37^{e}	79.45±4.26^{c}	38.14±4.18^{a}	69.47±6.24^{b}	79.47±3.18^{c}	80.61±6.62^{c}
甘氨酸 Gly	98.09±3.26^{c}	83.95±3.09^{b}	57.37±4.48^{a}	76.59±6.70^{b}	80.43±4.77^{b}	81.13±1.74^{b}
酪氨酸 Tyr	95.09±4.26^{d}	77.57±4.16^{c}	54.87±4.01^{a}	67.12±5.76^{b}	85.15±2.73^{c}	81.10±5.44^{c}
丙氨酸 Ala	97.50±3.69^{c}	79.21±5.41^{b}	68.99±7.24^{a}	75.82±6.43^{ab}	82.15±2.74^{b}	80.38±5.43^{b}

半胱氨酸 Cys	100.35±2.09^{e}	76.76±5.45^{c}	19.81±1.81^{a}	45.75±4.83^{b}	88.49±3.68^{d}	78.84±7.77^{c}
脯氨酸 Pro	100.40±3.81^{c}	87.54±6.02^{b}	24.05±4.67^{a}	82.80±6.83^{b}	88.53±5.72^{b}	89.50±3.86^{b}
必需氨基酸 Essential amino acids						
组氨酸 His	95.08±5.08^{cd}	71.45±8.71^{a}	66.17±2.87^{a}	68.78±3.24^{a}	85.43±3.26^{bd}	80.23±2.80^{b}
精氨酸 Arg	98.50±2.81^{d}	85.44 ±2.82^{bc}	42.42±6.61^{a}	79.13±6.51^{b}	91.32±0.96^{cd}	84.41±6.58^{bc}
苏氨酸 Thr	97.40±4.15^{e}	76.04±5.33^{c}	43.98±4.71^{a}	65.25±0.51^{b}	76.02±3.69^{c}	78.81±1.56^{c}
缬氨酸 Val	98.56±5.26^{d}	78.42±3.84^{c}	43.01±6.30^{a}	68.67±3.17^{b}	80.86±3.86^{c}	78.29±6.73^{c}
蛋氨酸 Met	96.76±1.60^{d}	77.74±4.66^{bc}	73.35±6.70^{ab}	68.39±2.75^{a}	98.35±6.21^{d}	85.58±5.32^{c}
苯丙氨酸 Phe	96.72±5.11^{d}	78.20±4.57^{c}	52.02±4.48^{a}	66.54±3.02^{b}	82.86±3.86^{c}	81.42±6.35^{c}
异亮氨酸 Ile	98.91±3.05^{c}	77.30±4.81^{b}	56.02±5.43^{a}	59.77±5.77^{a}	79.39±6.51^{b}	79.82±7.69^{b}
亮氨酸 Leu	98.63±4.90^{d}	77.41±6.79^{c}	49.85±3.49^{a}	68.40±2.67^{b}	84.32±3.69^{c}	80.94±5.59^{c}
赖氨酸 Lys	98.86±3.54^{d}	77.74±2.73^{b}	66.67±0.95^{a}	73.22±3.81^{b}	87.96±2.60^{c}	87.01±0.34^{c}
总氨基酸 Total amino acids	98.62±3.86^{d}	81.53±4.55^{c}	51.27±4.88^{a}	69.61±1.96^{b}	85.68±3.97^{c}	81.31±6.02^{c}

同行数据肩标不同字母表示差异显著(P<0.05)。

Values in the same row with different letter superscripts were significantly different (P<0.05).

3 讨 论

3.1 外源指示剂和营养物质表观消化率计算方法的选择

本试验采用 Cho 等[12]的方法配制试验饲料，即用待测原料取代一部分基础饲料，取代比例为 30%。但 Cho 等[12]的计算方法没有考虑到基础饲料和待测原料的养分对测定结果的影响。为此，采用 Bureau 等[13-14]在 Cho 等[12]研究的基础上对计算方法进行了改进[公式（2）]，进一步减小了因基础饲料与待测原料的养分差异导致对待测原料营养物质表观消化率的影响，从而提高了结果的准确度。

根据营养成分及指示剂在粪便和饲料中的含量，间接测定动物对饲料原料营养物质的利用率，是研究动物对饲料消化率的常见方法。常见的指示剂有 TiO_2、三氧化二钇、二氧化钛和酸不溶灰分等。TiO_2 具有化学性质稳定，不溶于水和稀酸，摄入 2~3 g/d 对动物无害，并能完全排泄到粪中(95%以上的回收率)等特点。与其他指示剂相比，TiO_2 具有回收率变异较小，不改变饲料颜色，无致癌性，可合法添加，检测灵敏度高，在饲料中的添加量低(一般为 0.2%~0.5%)等优点[15-16]。因此，本试验选用 TiO_2 为指示剂，以确保数据的准确性。

3.2 达氏鳇幼鱼对 6 种蛋白质原料中营养物质的表观消化率

干物质的消化率反映了鱼类对饲料原料总体的消化利用水平，其高低与饲料中粗纤维和粗灰分含量以及养分（蛋白质和脂肪）等的消化吸收程度有关。达氏鳇幼鱼对 6 种蛋白质原料中干物质的表观消化率为 54.79%～88.07%，其中以鱼粉和鸡肉粉的干物质表观消化率较高，羽毛粉、双低菜籽粕和玉米蛋白粉居中，肉骨粉最低（54.79%）。前人报道的杂交鲟[8]和西伯利亚鲟[9]对肉骨粉的干物质表观消化率均较低（55.8%～64.73%），与本研究结果一致，这可能与肉骨粉中粗灰分含量高有关。Kitagima 等[17]报道斑点叉尾鮰（*Ictalurus punctatus*）对粗灰分含量高的鱼粉和虾下脚料粉的干物质表观消化率较低。此外，在杂交罗非鱼[18]（*Oreochromis niloticus*×*Oreochromis aureus*）、虹鳟[13]（*Oncorhynchus mykiss*）和乌苏鳢[19]（*Pseudobagrus ussuriensis*）等的研究上也有类似的结果。

饲料能量的消化率反映了鱼类对饲料中蛋白质、脂肪和碳水化合物的总体可利用程度。达氏鳇幼鱼对 6 种蛋白质原料中总能的表观消化率类似于干物质表观消化率的变化趋势。6 种蛋白质原料中，以鱼粉（本试验测得鱼粉的总能表观消化率＞100%）和鸡肉粉的总能表观消化率较高，双低菜籽粕和玉米蛋白粉居中，肉骨粉和羽毛粉较低。本试验中，双低菜籽粕和玉米蛋白粉的干物质和总能表观消化率均低于鱼粉，与在乌苏鳢[19]、大黄鱼

[20](*Pseudosciaena crocea*)和欧洲鳇[10]等上的研究结果一致，这可能是因为植物性蛋白质中纤维素所占比例较高，而水生动物缺乏消化纤维素的酶系统，饲料中的纤维素不易被鱼类消化吸收[21]，而高含量的纤维素(>8%)可能降低鱼类对饲料干物质和能量的消化率[22]。达氏鳇幼鱼对羽毛粉的干物质和总能表观消化率分别为 72.35%、66.64%，与杂交鲟[8]、西伯利亚鲟[9]和团头鲂[23](*Megalobrama amblycephala*)对羽毛粉的干物质和总能表观消化率的结果较为接近。

本试验中，达氏鳇幼鱼对 6 种蛋白质原料中粗脂肪的表观消化率都在 99%以上，表明鳇幼鱼有很强的利用蛋白质原料中脂肪的能力，这与姜雪姣等[23]报道的团头鲂对膨化羽毛粉和玉米蛋白粉的粗脂肪表观消化率（95.7%、103.4%），Che 等[19]报道的乌苏鳇对鱼粉和肉骨粉的粗脂肪表观消化率（94.07%、91.01%）和 Safari 等[10]报道的欧洲鳇亚成鱼对鱼粉的粗脂肪表观消化率（98.1%）的结果较为一致。但达氏鳇幼鱼对玉米蛋白粉和双低菜籽粕的粗脂肪表观消化率是高于欧洲鳇亚成鱼[10]和乌苏鳇[19]的。

蛋白质原料中蛋白质的质量是影响鱼类营养的首要因子，而鱼类对其蛋白质的消化率是判断原料可利用性的重要指标[24]。本试验中，各蛋白质原料的粗蛋白质表观消化率均在 73%以上，其中鱼粉和鸡肉粉的粗蛋白质表观消化率分别达到 89.47%和 81.14%，均高于双低菜低粕（79.52%）和玉米蛋白粉（79.52%），这可能与以下 2 个方面的因素有关：一是植物蛋白质存在必需氨基酸的不平衡性[25]；二是植物蛋白质存在抗营养因子[26-27]，会影响鱼类的消化吸收。本试验中，双低菜籽粕和玉米蛋白粉的粗蛋白质表观消化率均接近 80%，表明上述 2 种蛋白质原料也能较好地被达氏鳇幼鱼消化吸收。Sullivan 等[28]认为植物蛋白质原料虽然不具有动物蛋白质原料那样高的粗蛋白质含量，但是许多植物蛋白质原料能够像动物蛋白质原料一样被肉食性鱼类和杂食性鱼类有效地消化，因此，植物蛋白质原料双低菜籽粕和玉米蛋白粉也可以作为达氏鳇幼鱼人工配合饲料的蛋白质来源之一。达氏鳇幼鱼对羽毛粉的粗蛋白质表观消化率为 73.62%、低于西伯利亚鲟[9]的 88.2%，接近欧洲

鳇[10]的 75%，高于杂交鲟[8]的 50.54%；达氏鳇幼鱼对肉骨粉的粗蛋白质表观消化率为 76.24%，低于杂交鲟[8]的 84.95%、西伯利亚鲟[9]的 83.9%，接近杂交鲟[8]的 77.54%，究其原因，一方面可能是杂交鲟在消化吸收方面的遗传特性与其他鲟有差异[8]；另一方面可能是受原料加工方式及来源不同的影响，原料及营养成分的差异也可导致消化吸收的差异[8]。

本试验中，达氏鳇幼鱼对各蛋白质原料中氨基酸和粗蛋白质的表观消化率变化趋势较为一致，同时发现不同的蛋白质原料中同一种氨基酸的表观消化率有很大的差异，同种蛋白质原料中不同种氨基酸的表观消化率也存在很大的差异，这与部分学者的报道[23,29]相一致。本试验中，除羽毛粉和肉骨粉外，达氏鳇幼鱼对其他 4 种蛋白质原料的总氨基酸表观消化率均在 80%以上，表明达氏鳇幼鱼对这 4 种蛋白质原料中的大部分氨基酸都能有效的利用。而达氏鳇幼鱼对羽毛粉和肉骨粉的总氨基酸表观消化率均在 70%以下，这可能与原料来源、新鲜度、营养组成和加工工艺等因素有关。

4 结 论

综上所述，达氏鳇幼鱼对 6 种蛋白质原料中干物质、粗蛋白质、粗脂肪、总能及总氨基酸和必需氨基酸的表观消化率均以鱼粉最好，鸡肉粉、双低菜籽粕和玉米蛋白粉次之，羽毛粉和肉骨粉较差，表明对于达氏鳇幼鱼而言，鸡肉粉、双低菜籽粕和玉米蛋白粉可以作为其优质的动植物蛋白质来源之一。对于羽毛粉和肉骨粉，由于受到原料品质和加工工艺的影响，其营养成分变异范围较大，因此在使用时应考虑新鲜度、来源和营养组成等因素，并控制其在达氏鳇幼鱼饲料中的用量。

参考文献：

[1] 徐奇友.鲟鱼营养与饲料研究进展[J].饲料工业,2014,35(24):1–6.

[2] HUNG S S O.Recent advances in sturgeon nutrition[J].Animal Nutrition,2017,3(3):191–204.

[3] LUO L,AI L C,LIANG X F,et al.n-3 long-chain polyunsaturated fatty acids improve the sperm,egg,and offspring quality of Siberian sturgeon *(Acipenser baerii*)[J].Aquaculture,2017,473:266–271.

[4] 陈细华,李创举,杨长庚,等.中国鲟鱼产业技术研发现状与展望[J].淡水渔业,2017,47(6):108－112.

[5] DE SILVA S S,ANDERSON T A.Fish nutrition in aquaculture[M].London:Chapman & Hall,1995:103–142.

[6] CHO C Y,KAUSHIK S J.Nutritional energetics in fish:energy and protein utilization in rainbow trout (*Salmo gairdneri*)[J].World Review of Nutrition and Dietetics,1990,61:132–172.

[7] 董小林,解绶启,雷武,等.粪便收集方式对异育银鲫表观消化率测定的影响[J].水生生物学报,2012,36(3):450－456.

[8] 李向松,郭志强,韩冬,等.杂交鲟对六种蛋白原料的表观消化率[J].水生生物学报,2015,39(2):431－435.

[9] LIU H,WU X,ZHAO W,et al.Nutrients apparent digestibility coefficients of selected protein sources for juvenile Siberian sturgeon (*Acipenser baerii* Brandt),compared by two chromic oxide analyses methods[J].Aquaculture Nutrition,2009,15(6):650–656.

[10] SAFARI O,NASERIZADEH M,ARANI M M.Digestibility of selected feedstuffs in subadult Caspian great sturgeon,*Huso huso* using settlement faecal collection and stripping methods[J].Aquaculture Nutrition,2016,22(2):293–303.

[11] RICHTER H,LÜCKSTÄDT C,FOCKEN U,et al.Evacuation of pelleted feed and the suitability of titanium (Ⅳ) oxide as a feed marker for gut kinetics in Nile tilapia[J].Journal of Fish Biology,2003,63(5):1080–1099.

[12] CHO C Y,SLINGER S J.Apparent digestibility measurement in feedstuffs for rainbow

trout[M]//HALVER J E,TIEW K.Finfish nutrition and fish feed technology.Berlin:Heenemann,1979:239–247.

[13] BUREAU D P,HARRIS A M,CHO C Y.Apparent digestibility of rendered animal protein ingredients for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J].Aquaculture,1999,180(3/4):345–358.

[14] BUREAU D P,HUA K.Letter to the editor of *Aquaculture*[J].Aquaculture,2006,252(2/3/4):103－105.

[15] 邓雪娟,刘国华,蔡辉益,等.分光光度计法测定家禽饲料和食糜中二氧化钛[J].饲料工业,2008,29(2):57－58.

[16] AAFCO.Official publication[S].Atlanta,GA:Association of American Feed Control Officials,1996.

[17] KITAGIMA R E,FRACALOSSI D M.Digestibility of alternative protein-rich feedstuffs for channel catfish,*Ictalurus punctatus*[J].Journal of the World Aquaculture Society,2011,42:306–312.

[18] ZHOU Q C,YUE Y R.Apparent digestibility coefficients of selected feed ingredients for juvenile hybrid tilapia,*Oreochromis niloticus*×*Oreochromis aureus*[J].Aquaculture Research,2012,43(6):806–814.

[19] CHE J,SU B,TANG B,et al.Apparent digestibility coefficients of animal and plant feed ingredients for juvenile *Pseudobagrus ussuriensis*[J].Aquaculture Nutrition,2017,23(5):1128–1135.

[20] 李会涛,麦康森,艾庆辉,等.大黄鱼对几种饲料蛋白原料消化率的研究[J].水生生物学报,2007,31(3):370－375.

[21] NRC.Nutrient requirements of fish[S].Washington,D.C.:National Academy Press,1993:114.

[22] ANDERSON J,JACKSON A J,MATTY A J,et al.Effects of dietary carbohydrate and fibre on the tilapia *Oreochromis niloticus* (Linn.)[J].Aquaculture,1984,37(4):303–314.

[23] 姜雪姣,梁丹妮,刘文斌,等.团头鲂对8种非常规饲料原料中营养物质的表观消化率[J].水产学报,2011,35(6):932－939.

[24] LEE S M.Apparent digestibility coefficients of various feed ingredients for juvenile and grower rockfish (*Sebastes schlegeli*)[J].Aquaculture,2002,207(1/2):79–95.

[25] HASAN M R,MACINTOSH D J,JAUNCEY K.Evaluation of some plant ingredients as dietary protein sources for common carp (*Cyprinus carpio* L.) fry[J].Aquaculture,1997,151(1/2/3/4):55–70.

[26] FRANCIS G,MAKKAR H P S,BECKER K.Antinutritional factors present in plant-derived alternate fish feed ingredients and their effects in fish[J].Aquaculture,2001,199(3/4):197–227.

[27] KROGDAHL A.Alternative protein sources from plants contain anti-nutrients affecting digestion in salmonids[C]//Proceedings of the 3rd International Symposium on Feeding and Nutrition in Fish.Tokyo:Tokyo University of Fisheries,1989:253–261.

[28] SULLIVAN J A,REIGH R C.Apparent digestibility of selected feedstuffs in diets for hybrid striped bass (*Morone saxatilis* ♀×*Morone chrysops*♂)[J].Aquaculture,1995,138(1/2/3/4):313－322.

[29] 叶元土,林仕海,罗莉.草鱼对 27 种饲料原料中氨基酸的表观消化率[J].中国水产科学,2003,10(1):60－64.

Nutrient Apparent Digestibility in Six Protein Ingredients for Juvenile Kaluga （*Huso dauricus*）

WU Jinping CHU Zhipeng CHEN Xihua* TANG Dan QIAO Xinmei LI Chuangju

YUE Huamei RUAN Rui LIU Wei

(*Key Laboratory of Freshwater Biodiversity Conservation of Ministry of Agriculture, Yangtze*

*Corresponding author, professor, E-mail: chenxh@yfi.ac.cn (责任编辑 菅景颖)

River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Science, *Wuhan* 430223, *China*)

Abstract: In order to evaluate the digestive ability of different protein ingredients for juvenile kaluga （*Huso dauricus*）, the test diets were consisted of 70% basal diet and 30% test ingredients, including fish meal, chick meal, feather meal, meat and bone meal, corn gluten meal and canola meal, and using 0.4% titanium dioxide （TiO_2） as an indicator to determine the apparent digestibility of dry matter, crude protein, crude lipid, gross energy and amino acids. The juvenile kaluga with an average body weight of (66.79±2.18) g were randomly divided into 7 groups with 3 replicates per group and 20 fish per replicate. The test fish fed the basal diet for 2 weeks, then fed the test diets for 1 weeks, and the fecal samples were collected for 10 days with a fine mesh net. The results showed that the apparent digestibility of dry matter, crude protein, crude lipid, gross energy and total amino acids in fish meal, chick meal, meat and bone meal, feather meal, canola meal and corn gluten meal were 54.79 % to 88.07%, 73.62% to 89.47%, 99.8% to 100.74%, 66.62% to 103.18% and 51.27% to 98.62%, respectively. Among the six protein ingredients, the apparent digestibility of crude lipid was ≥ 99%, the higher apparent digestibility of dry matter, crude protein and gross energy was observed in fish meal and chick meal, followed by corn gluten meal and canola meal, and feather meal and meat and bone meal presented the worse. The crude protein apparent digestibility of fish meal was the highest, at 89.47%, which was significant higher than other protein ingredients （$P<0.05$）. The chicken meal was followed by 81.14%, and there was no significant difference compared with meat and bone meal, canola meal and corn gluten meal （$P>0.05$）; the crude protein apparent digestibility of feather meal was the lowest, at 73.62%, and there was no significant difference compared with meat and bone meal （$P>0.05$） and it was significantly different from other protein ingredients （$P<0.05$）. The variation trend of the apparent digestibility of total amino

acids was basically consistent with that of crude protein apparent digestibility. In conclusion, for juvenile kaluga diet, fish meal is the best protein source, chick meal, canola meal and corn gluten meal may be used as the good protein sources. When the feather meal and meat and bone meal are added as the protein sources, the added level in the diet must be controlled.

Key words: juvenile kaluga (*Huso dauricus*); protein ingredient; nutrient; apparent digestibility